

平成24年度「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術研究開発」の研究開発目標・成果と今後の研究計画

1. 実施機関・研究開発期間・研究開発費

- ◆実施機関 同志社大学(幹事者), 北陸先端科学技術大学院大学, 東北大学
- ◆研究開発期間 平成21年度から平成24年度(4年間)
- ◆研究開発費 総額54.9百万円(平成24年度12.5百万円)

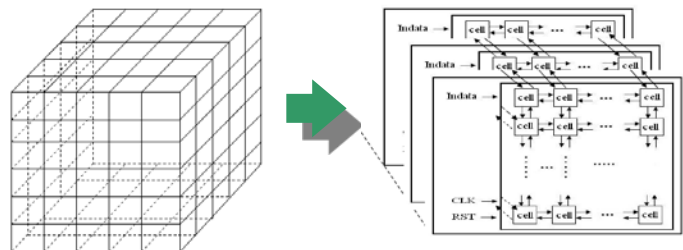
2. 研究開発の目標

・人体を収容できる大きさの三次元音響空間についてリアルタイムに音響レンダリングできるシステム(シリコンコンサートホール)を2013年までに開発する。具体的には、直方体領域(2m×2m×4m程度)の室内音場を想定し、音声周波数帯域(3kHzまで)のシリコンコンサートホールの実現を目指す。

3. 研究開発の成果

①音場シミュレーションのハードウェア化手法

音響空間を均一な小空間に分割し、各小空間に関連付けられた演算セルによる高速音圧計算



3次元音響空間

ハードウェアの演算セル

- A 3次元モデリング向けの新しいアルゴリズム
- B 時分割アーキテクチャ

研究開発成果: 3次元モデリング向け新しいアルゴリズム

3次元モデリングには、できるだけ多数の演算セルをFPGA内に実装することが不可欠。そのためには、できるだけ回路面積の小さなアルゴリズムの開発が必要。

- 本研究開発では、従来のDHMアルゴリズムを改良して、乗算回路を必要とせず、必要演算量が少ないアルゴリズムを開発、実装に成功。これにより1つのFPGAチップに収容可能な演算ノード数を増加させた。
- 境界条件の計算を並列計算可能なアルゴリズムに変更した。

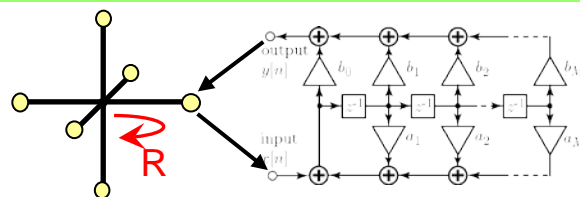
研究開発成果: 時分割アーキテクチャ

従来のアルゴリズムでは、ノード毎に演算セルが必要となり非効率。時分割処理技術が不可欠。

- 本研究開発では、FPGA内のブロックRAMを使用した時分割処理可能なアーキテクチャを開発。演算可能な空間の大きさを27倍に拡大。演算時間も40%向上。
- このアーキテクチャを実装し、デモシステムを完成した。

②デジタル境界処理技術

デジタルフィルタにより壁面反射率に任意の周波数特性を組み入れることで、音響レンダリングの臨場感を飛躍的に増大



デジタルホイヘンスモデル(DHM) デジタル境界(IIRフィルタ)

- A. GPUによるレンダリングとデジタル境界処理技術
- B. レンダリング結果提示技術

研究開発成果: GPUによるレンダリングとデジタル境界処理技術

臨場感の高い音響レンダリング技術の確立には、ホールなどの壁面反射条件の組み入れが不可欠。また、デジタル境界の効果検証には、現実的な大きさの音響空間のレンダリングが重要。

- 本研究開発では、32GPUクラスタを用いたレンダリング技術を開発。**7,050m³の音響空間を40kHzサンプリングによりレンダリング成功。266GFLOPSを達成。**

研究開発成果: レンダリング結果提示技術

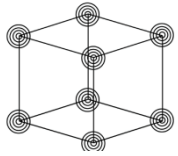
シリコンコンサートホールの実現には、音響レンダリングの結果を提示するための技術も不可欠。

- 本研究開発では、**157chのスピーカアレイへの出力**に成功。受音点の指向性と音源位置(18パート)を考慮した音響レンダリングにより、立体的で広がりのある音場の再現に成功。

「革新的な三次元映像技術による超臨場感コミュニケーション技術研究開発」の 研究開発目標・成果と今後の研究計画

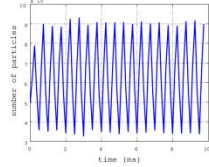
③音場LGA法によるレンダリング技術

音場LGA法に基づいて、1辺1mの立方体音響空間を音声周波数帯域までレンダリング可能なシステムをCPU上に構築する。



空気粒子の挙動
の論理演算表現

- A. 3次元音場LGA法による音声帯域のモデル化
- B. 音場LGA法の性能評価



音響物理事象のリアルタイムレンダリング

研究開発成果: 3次元音場LGA法による音声帯域のモデル化

3次元音場LGA法による音声周波数帯域の解析を実行。

●本研究開発では、4次元面心立方格子の3次元射影モデル(FCHCモデル)に基づいたアルゴリズムにより、 $0.34 \times 0.34 \times 0.34$ mの音場を音声周波数帯域までのモデル化に成功。より大きなメモリ容量の使用により、 $1 \times 1 \times 1$ mの音場をモデル化することも可能。

研究開発成果: 音場LGA法の性能評価

これまでに実装した音場LGAアルゴリズムの計算時間・再現精度を検討。

●本研究開発で提案した音場LGA法により、現状のスーパーコンピュータを用いれば実時間処理が可能であることを確認。
●改良が必要ではあるが、現状のアルゴリズムでも一定の物理精度で音場を予測することが可能であることを確認。

① 音場シミュレーションのハードウェア化手法の主な成果

① FPGA によるリアルタイム音響レンダリング技術

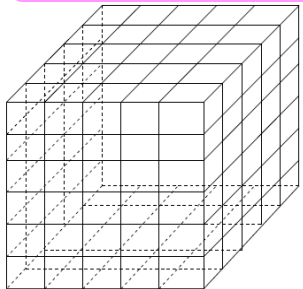


Fig.1 3次元音響空間

音響空間は均一の格子に分割される。計算セルは格子状の各ノードの音圧を計算する

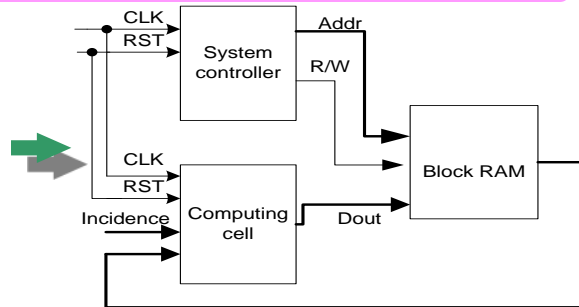


Fig.2 ハードウェアの演算セル

- A. 境界条件の改良による計算速度向上
- B. リアルタイム音響レンダリング
- C. 3次元音響シミュレーションの実装と評価

A. 境界条件の改良による計算速度向上

既存手法による境界条件の計算 (例: 右側境界):

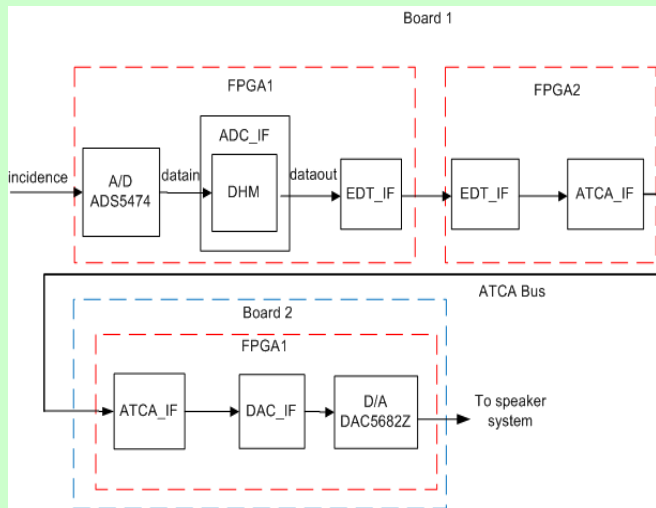
$$P^{n+1}(i, j, k) = P^n(i-1, j, k) + \frac{(1+R)\chi - (1-R)}{(1+R)\chi + (1-R)} [P^{n+1}(i-1, j, k) - P^n(i, j, k)]$$

データ依存性を排除し、計算速度を向上

改良手法による境界条件の計算 (例: 右側境界):

$$P^n(i, j, k) = [\chi^2(2P^{n-1}(i-1, j, k) + P^{n-1}(i, j+1, k) + P^{n-1}(i, j-1, k) + P^{n-1}(i, j, k+1) + P^{n-1}(i, j, k-1)) + 2(1-3\chi^2)P^{n-1}(i, j, k) + \frac{\chi(1-R) - (1+R)}{(1+R)} P^{n-2}(i, j, k)] / (\frac{\chi(1-R) + (1+R)}{(1+R)})$$

B. リアルタイム音響レンダリング



- リアルタイムレンダリング: 入射はA/Dボードを介して入力される。音場はDHMで計算され、仮想空間内の観測点からD/Aボードを介して出力される。これらの一連の動作は実時間で行われる。
- システムスケーラビリティ: このハードウェアシステムは、FPGA間及びFPGAボード間のインターフェースを変更することによって、複数のFPGAを並行動作させ、シミュレーション空間を拡大することができる。

C. 3次元音響シミュレーションの実装と評価

- FPGAベースのプロトタイプシステムを開発し、実装した。DHMの格子サイズを $32 \times 32 \times 16$ とし、Xilinx社XC5VLX330T-FF1738を用いて実装した場合、全体の5%のLUT、および84%のBlock RAMを使用する。
- DHM計算セルを200MHzで動作させた場合、シミュレーション空間は $3.62m \times 3.62m \times 1.81m$ に相当する。

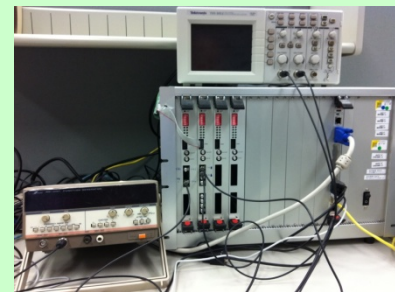


Table 1 Rendering time

Node	Hardware system	Software solution
$32 \times 32 \times 16$	real-time	61.021 minutes

シミュレーション環境

入射: Beethoven 交響曲第7番 (無響録音)

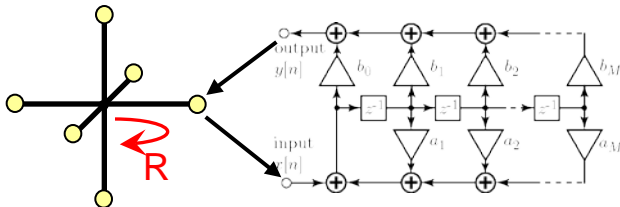
ホストPC: CPU: AMD Phenom 9500 Quad-core processor, 2.2 GHz; RAM: 16GB

Operating system: Windows 7 (64-bit); 開発ツール: Visual Studio 2012

② デジタル境界処理技術の主な成果

② デジタル境界処理技術

デジタルフィルタで壁面反射率に任意の周波数特性を組み入れることで、音響レンダリングの臨場感を飛躍的に増大



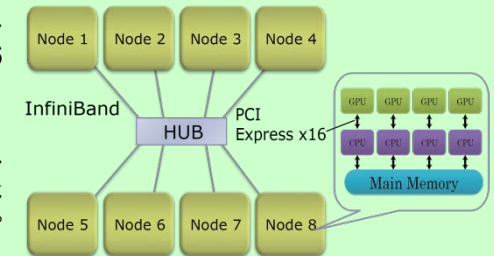
高精度DHM デジタル境界(IIRフィルタ)

- A. デジタル境界処理技術
- B. GPUによるレンダリング技術
- C. レンダリング結果提示技術

B. GPUによるレンダリング技術

● デジタル境界の効果を検証するためには、現実的な大きさの音響空間のレンダリングを実施し、その可聴化が重要となる。

● そのために必要なレンダリングの高速化として、32GPUが搭載されたクラスタを開発し、約266 GFLOPSの演算性能を達成した。これにより、約7,050m³というかなり現実的なスケールの音響空間のレンダリング(3秒間のインパルス応答計算)をCD並の音質(40kHzサンプリング)で、約24時間の計算時間で達成した。



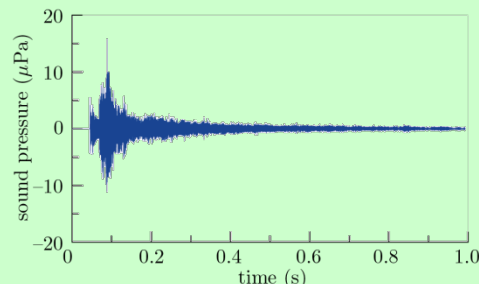
GPUクラスタの構成

A. デジタル境界処理技術

● コンサートホールなどの現実空間の境界壁面には、多様な材質が使用されており、残響特性などのホールの主要な音響特性を支配している。それらの壁面の反射率は任意の周波数特性を有しており、時間領域においては畳み込み積分により応答が求められる。

● 本研究開発では、時間領域において任意の周波数特性を組み入れるために、IIR型のデジタルフィルタを壁面に埋め込むデジタル境界を考案し、直方体室において残響特性の制御に成功した。

● GPUクラスタへ実装し、最終目標のスケールの音場についてリアルタイム処理を確認した。



残響特性(インパルス応答)

C. レンダリング結果提示技術

● シリコンコンサートホールの実現には、音響レンダリングの結果を提示するための技術も不可欠である。レンダリング結果を157チャンネルのスピーカアレイに出力して可聴化した結果、立体的で自然な音場が再現可能であることが確認できた。

● 18パートのオーケストラのレンダリングにより、広がりのあるリアルなオーケストラ再現が可能になった。



オーケストラ配置

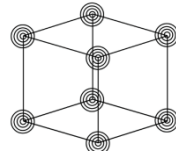


157chスピーカアレイ

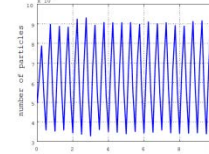
③音場LGA法によるレンダリング技術の主な成果

③音場LGA法によるレンダリング技術

音場LGA法に基づいて、1辺1mの立方体音響空間を音声周波数帯域までレンダリング可能なシステムをCPU上に構築する。



空気粒子の挙動の論理演算表現

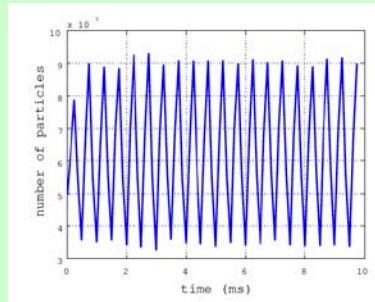


音響物理事象のリアルタイムレンダリング

- A. 3次元音場LGA法による音声帯域のモデル化
- B. 音場LGA法の性能評価

A. 3次元音場LGA法による音声帯域のモデル化

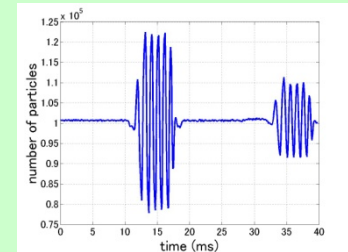
- 3次元音場LGA法をCPU上に実装することにより、
 - 0.34 x 0.34 x 0.34 m の立体音場
 - 音声帯域 (約4 kHz)までを解析することに成功



- 右図は、3 kHzの正弦波の伝搬後の波形
- 波形の歪みは見られるが、疎視化領域やアップサンプリングの改良などにより修正可能と考えられる
 - 使用計算機のメモリ容量の制限から、小領域の解析となったが、より大きな領域の解析が可能

B. 音場LGA法の性能評価

- 将来的な実時間処理の可能性を確認
- 使用した計算機では、実時間の7,200倍の計算時間
- 最先端のスーパーコンピュータを用いれば現在でも実時間演算が可能
- 20年後の汎用計算機で実時間処理の可能性



- 音場LGA法の再現精度をさらに検証
- 厳密解との比較の結果、基本的な伝搬・壁面反射などが精度良く再現されることを確認
- ただし、過剰な距離減衰が生じる
 - モデルの改良で対応可能

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等) ※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	標準化提案
五感コミュニケーションの中核的要素技術に関する研究開発	0 (0)	0 (0)	5 (3)	32 (15)	0 (0)	9 (2)	0 (0)

5. 研究成果発表会等の開催について

該当なし。

6. 今後の研究開発計画

この成果により、今後、どのような研究を行うのかを例示を上げながら、具体的、かつ簡潔に記載して下さい。

①音場シミュレーションのハードウェア化

FPGAによるリアルタイム音響シミュレーションの基本技術は確立したので、より大規模なFPGAを用いてシミュレーション空間を拡大したい。実用的なシミュレーション空間が得られた後、実際のアプリケーションに適用し、実用化を図りたい。NICTや他研究機関の持つ多チャンネルスピーカシステムと結合し、計算するだけでなく音響システムとして機能するようにしたい。

②デジタル境界処理技術の開発

開発されたレンダリング技術が、人に対してどの程度効果的に聴覚提示できるのかを検討するために、聴取による評価実験を実施する予定である。また、任意の音場に対応できるように境界形状などの組み入れができるように改良を行う。さらに、NICTやその他の研究機関の多チャンネル音響研究グループとも連携を試み、広い普及のために研究会やコンソーシアムの立ち上げ等を検討したい。

③三次元LGA法の精緻化・高速化

本プロジェクトで開発した音場LGA法を基に、アルゴリズムのさらなる高精度化・高速化に加え、VLSIによる高度並列化等の課題に取り組み、広帯域化を目指す。また、聴取実験等により、計算された音場の評価を行っていく。